

MODELLO DI VALUTAZIONE ENERGETICA DI UN IMPIANTO DI CLIMATIZZAZIONE

A. De Danieli^a, F. Vitali^a, G. Dotelli^a, D. Botta^a, A. Giacomucci^b, G. Donato^b

^aDipartimento di Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica "G. Natta", Politecnico di Milano, p.zza L. da Vinci 32, 20133 Milano

^bABB Italia, via L. Lama 33, 20055 Sesto San Giovanni (MI)

SOMMARIO

Come rilevato dalla Comunità europea, attualmente circa il 40% dell'energia consumata ogni anno in Europa è assorbita dal settore residenziale e terziario. Preoccupa in particolare la crescente proliferazione degli impianti di condizionamento dell'aria nei paesi europei meridionali. Poiché ciò comporterebbe un aumento del costo dell'energia elettrica e uno squilibrio del bilancio energetico di tali paesi, è di vitale importanza una razionalizzazione del sistema energetico e uno sforzo nella direzione del risparmio energetico come misura di primo intervento.

In questa ottica il nostro lavoro vuole essere un contributo al dibattito sulla messa a punto della metodologia necessaria alla valutazione del rendimento energetico degli edifici. Infatti le norme fino ad oggi emanate hanno sempre privilegiato la regolamentazione dell'energia destinata al riscaldamento, mentre oggi, e specialmente in un Paese importatore di energia come l'Italia, si impone una riflessione sui consumi, sempre crescenti, dovuti alla climatizzazione.

Si è dunque proceduto all'analisi di un impianto di condizionamento di un edificio di grandi dimensioni e della sua complessa interazione con l'ambiente circostante, giungendo infine a definire un modello matematico che descrive la risposta del sistema al variare delle condizioni esterne (temperatura, intensità della radiazione solare, umidità).

INTRODUZIONE

Già molti studiosi negli ultimi anni hanno rilevato l'importanza sempre crescente dei consumi di energia per la climatizzazione estiva degli edifici, specialmente per quelli destinati a uffici o ad attività commerciali. Soprattutto negli ultimi dieci anni la climatizzazione estiva è passata in Italia da un servizio d'élite ad un fenomeno di massa, con un'autentica esplosione nell'installazione di condizionatori per appartamenti [1]. Se a questi impianti si aggiungono quelli destinati al raffrescamento degli uffici, è ragionevole aspettarsi che l'impatto dei condizionatori d'aria sulle richieste di energia elettrica sia un problema serio per tutti i paesi d'Europa [2].

A questo proposito il Ministero dell'Ambiente italiano afferma, nel suo sito Internet www.minambiente.it, che "il problema dei consumi energetici nell'edilizia adibita ad attività terziarie si presenta particolarmente interessante a causa degli elevati consumi specifici ad essa relativi in termini di energia primaria; essi sono da imputarsi principalmente al condizionamento e all'illuminazione artificiale degli ambienti, risultano fortemente condizionati dal tipo di metratura adottata. La ricerca energetica ha per lungo tempo posto un rilievo decisamente maggiore al problema dei consumi legati al riscaldamento degli edifici piuttosto che ai consumi imputabili al condizionamento e all'illuminazione artificiale. (...). Si vede che l'incidenza del condizionamento è decisamente rilevante (...). Il tipo di utenza terziario che sembra più adatta ad una analisi più approfondita dei flussi energetici e che presenta i più convenienti rapporti tra costi di intervento e benefici conseguibili è quella relativa agli edifici adibiti ad uffici".

Da queste considerazioni è nata l'idea per un lavoro che desse un contributo alla definizione di una metodologia per

l'analisi del consumo di energia in regime estivo di edifici adibiti ad uffici, obiettivo al quale si è giunti attraverso lo studio del centro direzionale dell'ABB in Italia.

CASO DI STUDIO: IL CENTRO DIREZIONALE DELL'ABB ITALIA

L'edificio: caratteristiche architettoniche ed impiantistiche

L'edificio oggetto di esame, realizzato nell'ex area Marelli di Sesto San Giovanni (MI), è a facciata continua a doppia pelle [3], che si sviluppa per 13400 m² e copre un'area di circa 4.200 m². E' costituito da 11 piani (più due interrati ad uso parcheggio) per un'altezza di 50 m e uno sviluppo lineare di oltre 120 m.

Per ridurre l'impatto visivo della costruzione è stata scelta una forma ad S che non permettesse di percepire l'intero sviluppo dell'edificio, indipendentemente dal punto di vista. Per snellirne ulteriormente la forma, si è scelto di ridurre l'estensione dei piani superiori; salendo infatti, si ha un restringimento progressivo dal settimo fino al decimo ed ultimo piano.

Accedendo al piano terra dalla reception si incontra un'ampia hall che si estende in altezza su due piani, e da cui è possibile accedere alla sala mensa. Sempre al piano terra si trovano varie strutture di servizio, tra cui le tre sale convegno (utilizzabili sia singolarmente che come un'unica sala) e l'ufficio di gestione dell'edificio.

Già a partire dal primo piano la geometria si snellisce, seguendo la sagoma dei piani superiori tranne che nella parte centrale; su questo piano trovano posto degli uffici e degli spazi ad uso comune, utilizzati per corsi e riunioni, e le due ali

sono messe in comunicazione tramite dei collegamenti che nella zona centrale passano a fianco della hall.

Al secondo piano anche la zona centrale si restringe; così l'edificio a partire da questo piano raggiunge la sagoma definitiva, che prevede per tutta la lunghezza una larghezza pari a 15 m.

Ogni piano dell'edificio è suddiviso in due ali simmetriche di uffici messe in comunicazione tramite una zona centrale di servizio. Le due ali sono autonome per quanto riguarda la gestione e la sicurezza.

La copertura dell'edificio è stata utilizzata come sede per apparecchiature tecniche (caldaie, unità di trattamento dell'aria e batterie di recupero del calore) e per un eliporto.

Sopra il solaio a ogni livello per migliorare l'isolamento acustico e smorzare il calpestio sono stati aggiunti un massetto e un pavimento galleggiante occupanti uno spessore di 15 cm; questa intercapedine è stata inoltre utilizzata come sede per l'impiantistica elettrica e telefonica. Lo spessore totale del solaio risulta pari a 30 cm.

La struttura portante dell'edificio può quindi essere scomposta in:

- torre centrale in cemento armato, poggiante su fondazioni in cemento armato;
- vani scala ed ascensori nelle ali, situate alle estremità e in posizione intermedia, poggianti su fondazioni in cemento armato;
- telaio costituito da pilastri puntiformi, travi longitudinali e trasversali in acciaio, il tutto supportato da fondazioni in cemento armato.

L'esterno dell'edificio si presenta come una superficie vetrata continua a doppio involucro, per il cui isolamento termico è stato scelto un sistema ad intercapedine interna a singolo elemento.

L'involucro esterno è stato realizzato con un vetro-camera multistrato costituito da:

- lastra esterna in cristallo selettivo Storay Safir 61/32, con fattore solare FS pari a 32% e fattore di trasmissione luminosa TL 61%;
- camera d'aria da 16mm, riempita di gas argon per aumentarne la capacità isolante;
- lastra interna in cristallo stratificato di sicurezza Visarm 44,32 costituito da due cristalli float chiaro da 4mm e doppio foglio di polivinilbutirrale PVB da 0,76mm.

Sullo stesso telaio è stato montato, in posizione più interna, una lastra in cristallo di sicurezza temperato da 8mm allo scopo di formare l'intercapedine ventilata. La camera d'aria si estende per 180 mm, ed è attraverso di essa che passa tutta l'aria di ricambio dell'ufficio. Si è quindi ottenuto con uno spessore di circa 22 cm un sistema integrato in grado di garantire elevata luminosità naturale.

L'adozione del sistema a singolo elemento, oltre a rispondere alle esigenze di semplicità di montaggio e manutenzione, ha concesso ampia libertà ai progettisti nelle scelte architettoniche. In particolare è stata facilitata la costruzione della facciata curvilinea che caratterizza l'edificio.

La sagoma a S disegnata dalla planimetria dell'edificio ha rilevanza non solo dal punto di vista architettonico, ma anche dal punto di vista del comportamento termico dell'edificio. L'andamento curvilineo della facciata determina infatti massimi della radiazione solare nelle varie zone in momenti diversi della giornata. Alcune zone risultano così ombreggiate nell'arco della giornata; mentre altre anche d'inverno tendono a scaldarsi maggiormente.

Il sistema a doppio involucro rappresenta però solo una parte del contenuto innovativo dell'edificio per quanto

riguarda la climatizzazione. Una struttura portante così leggera, con ingombri ridotti ai minimi termini, ha permesso di progettare l'ambiente interno come un *open space*, in cui ogni piano costituisce quasi un ambiente unico. Questo ha consentito un posizionamento più razionale dei pannelli radianti caldi e freddi, libero dalla geometria di singoli uffici e più rispondente ad una gestione globale dell'edificio.

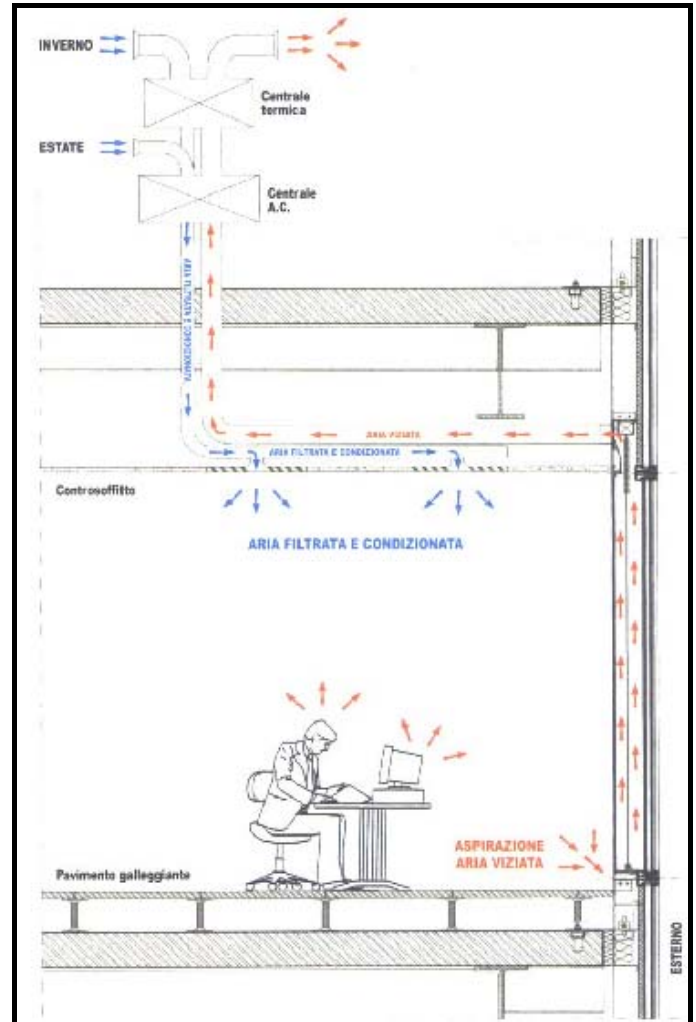


Figura 1. Circolazione dell'aria in un locale interno

Per quanto riguarda il controllo termoigrometrico e qualitativo dell'aria, l'edificio prevede un sistema automatizzato di ricambi orari dell'aria, con controllo dell'umidità, mentre la climatizzazione degli spazi interni avviene mediante travi radianti, nascoste dalla controsoffittatura a griglia aperta. Un sistema di monitoraggio rileva l'umidità dell'aria e ne regola il tenore durante il ricambio: l'aria è immessa da tutta la superficie del controsoffitto e recuperata da bocchette a filo di facciata (figura 1). Sensori ogni 20 m² rilevano la temperatura e permettono di gestire il comfort degli utenti, ma anche di erogare le calorie e le frigorifiche necessarie zona per zona. Infatti l'elettrovalvola di ogni pannello del freddo è comandata da un sensore di temperatura: quando la temperatura rilevata eccede i 24°C la valvola apre e permette il passaggio dell'acqua fredda, passaggio che viene nuovamente interdetto non appena la temperatura si abbassa sotto i 21°C. E' come se l'edificio funzionasse per isole di comfort individuale o semicollettivo, poiché le aree di rilevamento a volte comprendono il singolo

ufficio oppure le aree *open space* con gruppi di quattro persone.

Su tutto il perimetro esterno sono poi posizionati i pannelli caldi per il riscaldamento invernale; nei mesi freddi questi hanno il compito di formare un fronte di aria calda che faccia da barriera per il flusso termico. In questo modo è quasi sufficiente riscaldare l'aria del perimetro esterno per garantire un buon comfort su tutto il piano.

Il controllo della luce avviene tramite la presenza, nell'intercapedine del doppio involucro, di veneziane mobili, la cui posizione (aperta-chiusa) e inclinazione vengono gestite da uno specifico software, in relazione alla posizione del sole nell'arco della giornata e alla luminosità del cielo (rilevata da un sensore in copertura). Essendo la facciata caratterizzata da un orientamento variabile della superficie, anche la posizione delle lamelle varia lungo lo sviluppo a S dell'involucro. Per quanto riguarda la percezione interna, le due facciate dell'edificio hanno un comportamento opposto durante la giornata: la facciata colpita dal sole ha le veneziane abbassate e la luce interna è diffusa grazie al filtro del sistema di oscuramento; il fronte opposto, che rimane nell'ombra, ha invece le veneziane completamente alzate per ricevere la luce diffusa dell'atmosfera.

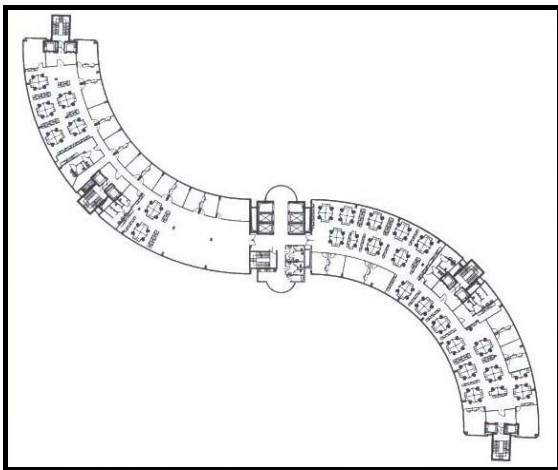


Figura 2. Pianta del terzo piano dell'edificio

Data la complessità dell'edificio e della simulazione che si vuole eseguire, si è reso necessario lavorare su un modello semplificato dell'edificio stesso. In particolare la sagoma dell'edificio, a forma di S, pone problemi riguardo all'incidenza della radiazione solare. In ogni istante infatti una parte dell'edificio, variabile nel corso della giornata, risulta nascosta alla radiazione solare incidente perché oscurata dall'altra parte dell'edificio. Questo aspetto risulta particolarmente difficile da trattare e si è deciso allora di usare un modello a pianta rettangolare che tenesse conto dell'orientazione media dell'edificio reale e che avesse i suoi stessi parametri geometrici. Per ogni piano si è cercato di mantenere gli stessi valori dell'edificio reale per il volume, per la superficie pavimentata e per le superfici vetrate. Si è partiti definendo un piano tipo (il terzo) e si sono poi fatti gli aggiustamenti per i piani che li necessitavano (figura 2).

L'ultimo parametro geometrico da stimare è l'orientamento dell'edificio rispetto alla direzione Nord-Sud, che ne influenza notevolmente il comportamento termico in relazione alla diversa incidenza della radiazione solare nell'arco della giornata: i valori adottati sono riportati in tabella 1.

Lato	Lato OVEST	Lato NORD	Lato EST	Lato SUD
Azimut	70°	160°	-110°	-20°

Tabella 1. Orientamento dei quattro lati dell'edificio modello a pianta rettangolare.

Rendimento energetico

La ricerca di una funzione che riassume in sé le caratteristiche energetiche dell'edificio, ovvero che desse un'idea del rendimento energetico in regime estivo di tutto lo stabile, è sfociata nell'adozione di una metodologia di analisi di tipo exergetico. La funzione exergetica di tutto il sistema rappresenta la quantità di energia che viene sprecata durante il processo di condizionamento (per una applicazione vedi [4]): dalla sua minimizzazione rispetto alle variabili sotto controllo è possibile inferire soluzioni atte ad attuare un risparmio energetico.

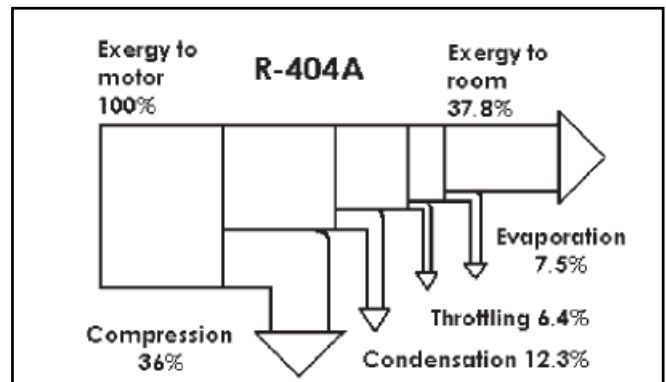


Figura 3. Il diagramma di Grassmann per un ciclo frigorifero.

In figura 3 è riportato un diagramma esemplificativo delle perdite di exergia in un ciclo frigorifero [5]: in questo caso le maggiori perdite avvengono nel compressore.

Il Libro Bianco "Energia-Ambiente-Edificio" dell'ENEA a questo proposito afferma: "Recenti studi e ricerche hanno evidenziato il contributo che può essere fornito dallo sfruttamento dell'exergia. [...]. Sviluppando questi concetti e valutando i bilanci energetici del sottosistema si stanno affermando applicazioni di sistemi e tecnologie che, basandosi su queste impostazioni, promuovono sistemi definiti "a bassa temperatura" o "exergetici", con risvolti molto interessanti sull'efficienza energetica e gli impatti sull'ambiente"[6].

Per definire in maniera completa questa funzione di molte variabili, è però di capitale importanza conoscere l'evoluzione temporale della temperatura media degli uffici, della temperatura dell'aria dopo che essa ha lambito il pannello del freddo e della potenza elettrica istantanea assorbita dai motori elettrici dei gruppi frigoriferi.

Simulazione del comportamento energetico dell'edificio

Si è scelto di suddividere il volume dell'edificio in tanti parallelepipedi che avessero dimensioni comparabili a quelle di un ufficio medio: in particolare ogni parallelepipedo ha altezza e larghezza pari a quelle di un ufficio medio

(rispettivamente 3,6 e 4,5 metri) e profondità maggiore (7,33 metri contro 4,5 metri), questo perché ognuno di questi tasselli somma in sé anche una parte degli elementi comuni (bisogna tener conto anche che parte del volume dell'edificio è occupato da scale, aree ristoro, ascensori eccetera, e non solo uffici).

Così facendo si ottiene una suddivisione regolare dello stabile, sempre considerato nella sua approssimazione "equivalente" rettangolare: in particolare le facciate nord e sud risultano essere occupate da 49 uffici equivalenti, mentre le facciate est ed ovest da 320 uffici equivalenti.

In ogni parallelepipedo (d'ora in poi denominato ufficio "medio equivalente") si considera una delle facce minori interamente vetrata (quindi si considera una esposizione al sole di 16,2 m² per ufficio "medio equivalente").

Ogni tassello possiede un pannello del freddo "equivalente" (rispetto alle dimensioni dell'ufficio) destinato ad asportare calore dal volume di interesse, regolato come nella realtà dell'edificio.

Gli ingressi del sistema sono stati definiti come funzioni variabili del tempo: (1) la Radiazione Solare Totale (RST) incidente sulle vetrate di ciascuno dei quattro lati dell'edificio ridotto a rettangolo; (2) la temperatura dell'ambiente esterno (Tex); (3) l'umidità relativa dell'aria esterna (Uex); (4) l'Apporto Gratuito Interno (AGI, definito secondo la norma UNI 11135 [7]). Le prime tre sono grandezze note per medie orarie fornite dalle più vicine centraline di monitoraggio della regione Lombardia: per ottenere l'andamento istantaneo della radiazione solare e della temperatura esterna tali medie sono state opportunamente elaborate, giungendo infine ad ottenere funzioni continue nel tempo; per l'umidità relativa sono bastati i valori forniti dalla regione; l'AGI è stato stimato per medie orarie.

Si è partiti dall'analisi del sistema costituito da motori elettrici-utilizzatori-ciclo frigorifero, così come riassunto nello schema di figura 4: in effetti, benché il componente principe dal punto di vista del consumo energetico sia il compressore, non bisogna dimenticare che agiscono sul ciclo anche pompe e ventilatori, anch'essi alimentati da motori asincroni. L'impianto di refrigerazione è costituito da quattro gruppi frigoriferi, ciascuno dei quali vanta una potenza installata di 390 kW. Ogni gruppo frigorifero consta di un refrigeratore di liquido con condensazione ad aria.

Il frigorifero in questione, per svolgere la sua opera, assorbe energia elettrica attraverso i compressori (ve ne sono due, di cui uno viene usato a regimi di carico molto bassi), i ventilatori e le pompe: l'incidenza delle pompe è limitata, mentre quella dei ventilatori, in condizioni nominali (temperatura esterna 35°C, temperatura dell'acqua in uscita dall'evaporatore 7°C, temperatura dell'acqua in entrata all'evaporatore 12°C) è pari a circa l'11% della potenza totale entrante (che somma a circa 300 kW).

Globalmente è stato possibile definire una efficienza complessiva dell'impianto, che è spesso denominata in letteratura [8] come SCOP (*System Coefficient of Performance*), che è la potenza termica asportata dall'impianto in funzione della potenza elettrica trifase entrante nel motore del frigorifero e della temperatura esterna. È una funzione che si approssima abbastanza bene con una polinomiale: cresce fino al valore nominale di funzionamento dei gruppi frigoriferi (800 kW termici), ha una lieve flessione per potenze leggermente superiori a quelle nominali e poi riprende a crescere (ovviamente va tenuto presente che il motore elettrico non potrà essere sovraccaricato per troppo tempo). Il grafico riportato in figura 5 rappresenta

l'andamento dell' SCOP in funzione del carico frigorifero imposto, supposta la temperatura esterna 35°C.

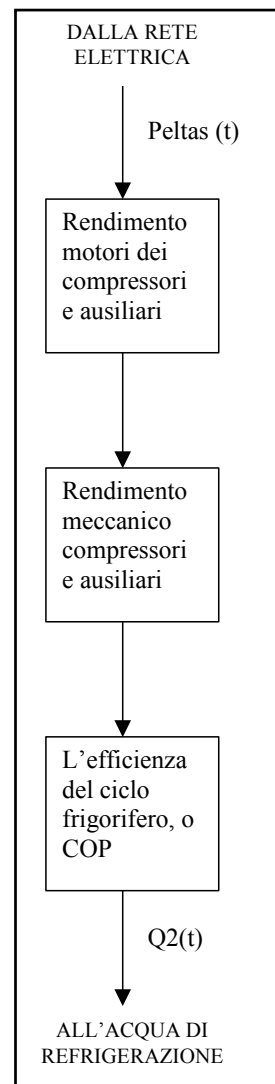


Figura 4. Schema di calcolo dell'efficienza globale dell'impianto frigorifero.

Sulla base di questi dati possiamo concludere che in condizioni nominali l'efficienza globale calcolata, definita come il rapporto tra la potenza frigorifera del sistema e la totale potenza elettrica assorbita, $SCOP = Q2(t)/Peltas(t)$, risulta pari a 2,52 contro un dato di 2,74 ottenuto da prove sperimentali [9]; l'approssimazione ottenuta è pertanto più che soddisfacente: il valore calcolato è pari al 92% di quello sperimentale.

In base a questi risultati, conoscendo quanto il frigorifero viene caricato, è possibile conoscere la potenza elettrica assorbita per il funzionamento a vari regimi. La potenza frigorifera imposta al ciclo è dovuta a due contributi: (1) il carico di raffreddamento dovuto alla necessità di raffreddare l'acqua riscaldata negli uffici e (2) il carico termico imposto dalla necessità di deumidificare e raffreddare fino al valore voluto il ricambio d'aria. Per il calcolo della potenza frigorifera utilizzata per la deumidificazione, $Qh(t)$, si è proceduto per via algebrica alla ricerca di valori medi orari; per il calcolo della potenza frigorifera utilizzata per il raffreddamento, $Qr(t)$, è necessario conoscere la temperatura

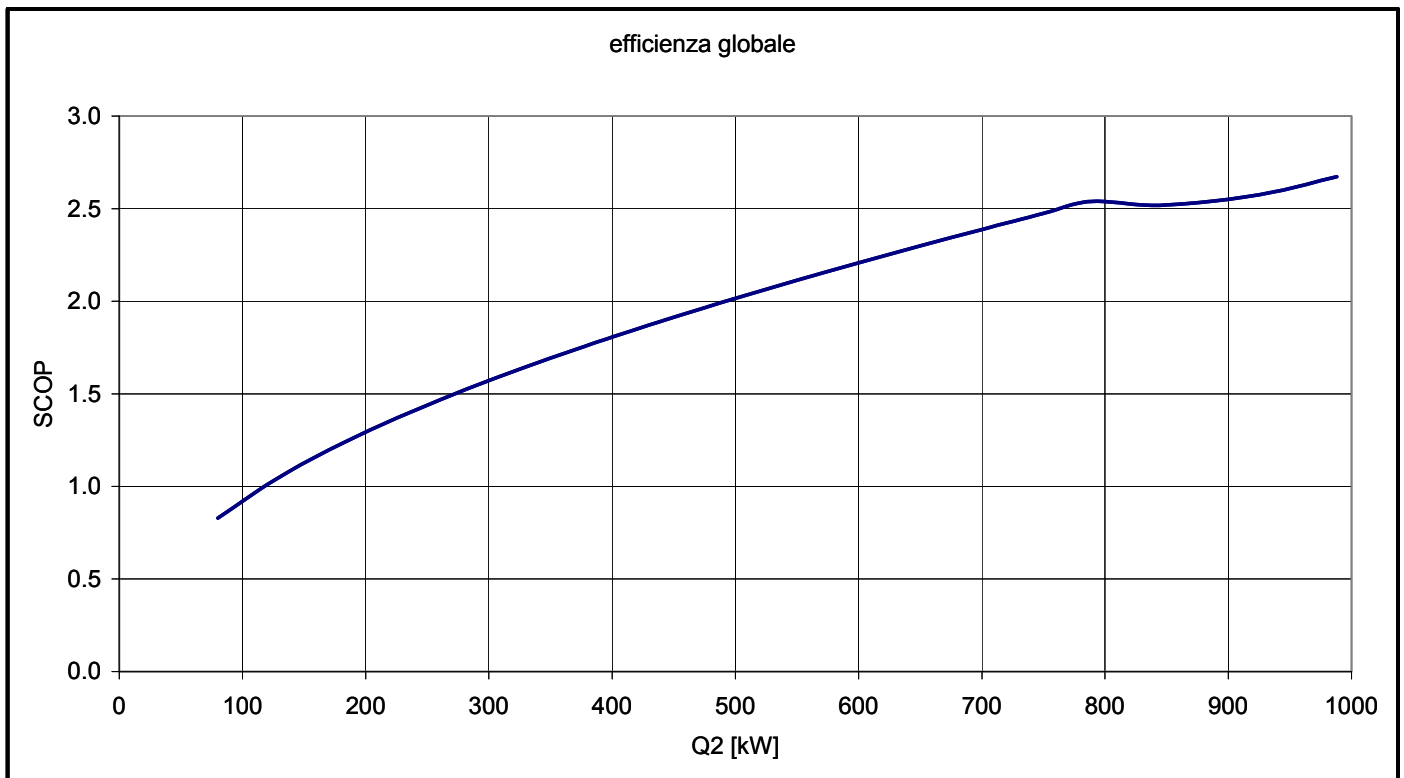


Figura 5. Efficienza globale calcolata (SCOP, *System coefficient of performance*) in funzione della potenza frigorifera imposta.

dell'acqua in uscita dal pannello del freddo, $T_w(t)$ (per maggiori dettagli si veda lo schema riportato in figura 6).

Per questo si è resa necessaria la scrittura di un sistema di equazioni che tenesse conto dell'evolversi delle variabili di interesse durante la giornata, sistema di equazioni che si è rivelato essere di tipo algebrico-differenziale.

Per descrivere l'interfaccia tra l'edificio e l'ambiente si è scelto un approccio che ha portato alla scrittura di una rete termica a parametri concentrati, a due costanti di tempo, integrata con un modello differenziale semplificato che tiene conto della convezione che avviene nella camera d'aria della doppia pelle.

CONCLUSIONI

In sintesi, questo articolo ha voluto mettere in luce una metodologia di calcolo in grado di legare univocamente il carico elettrico per condizionamento di un grande, moderno edificio per uffici alle condizioni climatiche esterne. L'edificio ABB si è rivelato campo di prova ideale per questa trattazione, essendo una struttura completamente automatizzata e gestita in maniera centralizzata. Il sistema di equazioni viene in questi giorni implementato in software Visual Fortran, e i primi risultati dell'analisi numerica saranno presentati al convegno.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. R. Lazzarin, Introduzione, in R. Lazzarin (ed.), Il condizionamento dell'aria, Dario Flaccovio Editore, Palermo, 2003.
2. F. Castellotti, Le superfici vetrate innovative, in R. Lazzarin (ed.), Il condizionamento dell'aria, Dario Flaccovio Editore, Palermo, 2003.
3. H. Manz, A. Schaelin, H. Simmler, Airflow patterns and thermal behavior of mechanically ventilated glass double façades, *Building Environ.*, vol. 39, pp. 1023-1033, 2004
4. G. Q. Zhang, L. Wang, L. Liu, Z. Wang, Thermo-economic optimization of a small size central air conditioner, *Applied Thermal Eng.*, vol. 24, pp. 471-485, 2004
5. A. Stegou-Sagia and N. Pagnigiannis, Exergy losses in refrigerating systems. A study for performance comparisons in compressor and condenser, *Int. J. Energy Res.*, vol. 27, pp. 1067-1078, 2003.
6. AA.VV., Libro Bianco "Energia Ambiente Edificio", Il Sole 24 Ore editore, Milano, 2004
7. Norma UNI 11135 Condizionatori d'aria, refrigeratori d'acqua e pompe di calore-Calcolo dell'efficienza stagionale, 2004
8. Y. Yao, Z. Lian, Z. Hou, X. Zhou, Optimal operation of a large cooling system based on an empirical model, *Applied Thermal Eng.*, vol. 24, pp. 2303-2321, 2004.
9. Comunicazioni private da parte di ABB.

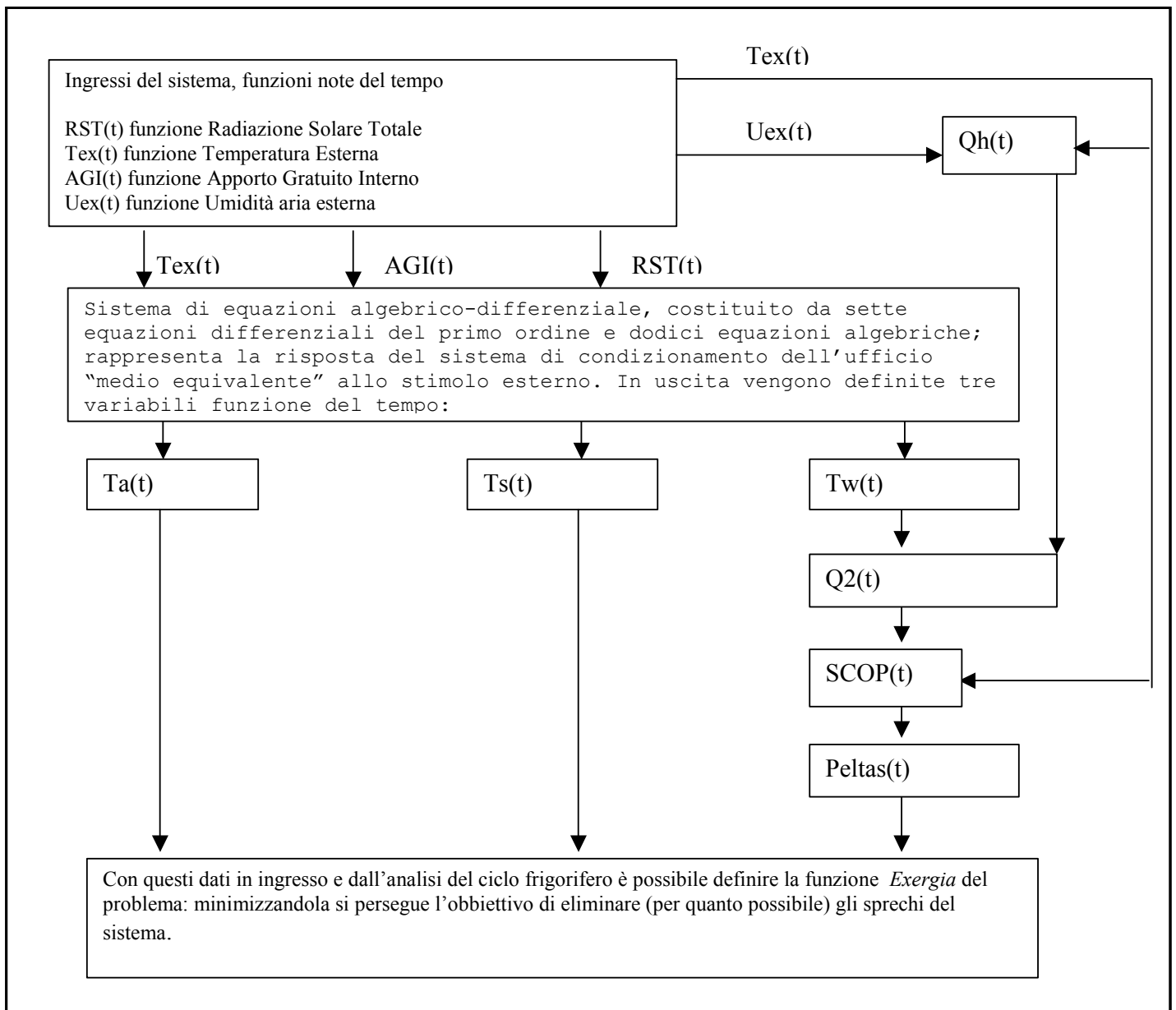


Figura 5. Schema di flusso del procedimento adottato nello studio.

SIMBOLI UTILIZZATI NEL TESTO

AGI	Apporto Gratuito Interno	[W]
Peltas	Potenza Elettrica Assorbita da ciascun frigorifero	[W]
Q2	Potenza frigorifera di ciascun frigorifero	[W]
Qh	Potenza frigorifera utilizzata per la deumidificazione	[W]
Qr	Potenza frigorifera utilizzata per il raffreddamento	[W]
RST	Radiazione Solare Totale incidente sui vetri	[W/m ²]
SCOP	Efficienza globale di un impianto frigorifero	[adimensionale]
Ta	Temperatura dell'aria dopo che ha lambito il pannello del freddo	[°C]
Ts	Temperatura media dell'aria nella stanza	[°C]
Tw	Temperatura dell'acqua all'uscita dal pannello del freddo	[°C]
Uex	Umidità relativa dell'aria esterna	[adimensionale]